

## SUNGRAZING 혜성이 방출하는 X-선 관측 가능성에 관한 연구

오수연<sup>1</sup>, 이유<sup>1†</sup>, 나자경<sup>2</sup>, 김용하<sup>1</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>한국천문연구원

### DETECTABILITY OF SUNGRAZING COMET SOFT X-RAY IRRADIANCE

Su Yeon Oh<sup>1</sup>, Yu Yi<sup>1†</sup>, Jakyoung Nah<sup>2</sup>, and Yong Ha Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2</sup>Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: osy1999@cnu.ac.kr, euyiyu@cnu.ac.kr

(Received September 9, 2007; Accepted September 21, 2007)

#### 요 약

오르트 구름을 출발하여 태양계 안쪽으로 들어오는 혜성 가운데 오르트 구름으로 되돌아가지 못하고, 태양에 매우 근접하여 태양에 충돌해 버리거나 강한 중력에 의해 쪼개져 사라지는 혜성을 sungrazing comet이라고 한다. 태양에 가까워지면서 태양열에 의해 혜성의 얼음이 승화되면서 그 존재를 확인하게 되는데, 태양풍의 고전리된 중원소이온과 충돌에 의한 전하교환의 상호작용에 의해 혜성에서 발생하는 가스량과 X-선 방출량을 기존 모델(Mendis & Flammer 1984, Cravens 1997)을 적용하여 근사 계산한 결과, 혜성핵의 반지름이 1km 정도인 경우 태양으로부터 거리가 태양반경의 3배 이내인 거리에서 GOES 위성의 X-선 망원경으로 탐지가능한 것으로 보인다.

#### ABSTRACT

Originating from the Oort cloud, some comets disappear to impact against the Sun or to split up by strong gravitational force. Then they don't go back to the Oort cloud. They are called sungrazing comets. The comets are detected by sublimation of ices and ejection of gas and dust through solar heat close to the Sun. There exists the charge transfer from heavy ions in the solar wind to neutral atoms in the cometary atmosphere by interaction with the solar wind. Cometary atoms would be excited to high electronic levels and their de-excitation would result in X-ray emission, or it would be scattering of solar X-ray emission by very small cometary grains. We calculated the X-ray emission applying the model suggested by Mendis & Flammer (1984) and Cravens (1997). In our estimation, the sungrazing comet whose nucleus size is about 1 km in radius might be detectable within a distance of 3 solar radius from the sun on soft X-ray solar camera.

*Keywords:* comet, X-ray, solar wind

---

<sup>†</sup>corresponding author

## 1. 서 론

혜성핵의 집합장소인 오르트의 구름(Oort comet cloud)으로부터 출발한 ‘더러운 눈덩어리(dirty snowfall)’라 불리는 혜성은 간헐적으로 때로는 주기적으로 지구에서 관측이 가능한 태양계 구성원이다. 태양 가까이에서 관측되는 혜성은 중심부의 핵과 이를 둘러싼 밝은 코마(coma), 이 주위를 넓게 싸고 있는 수소운, 태양 반대쪽으로 길게 뻗친 각각 먼지와 가스로 이루어진 두 종류의 꼬리 등의 구조로 되어 있다.

우리가 관측할 수 있는 혜성의 실체는 태양 빛을 반사하는 먼지와 가스로 구성된 일시적인 대기인데 혜성이 태양으로부터 멀리 떨어져 있을 때는 태양 복사량이 부족하기 때문에 검출하기 어렵다. 또한 우리가 혜성을 관찰할 수 있도록 하는 것은 태양열에 의한 얼음 덩어리의 증발이다. 혜성은 주로 먼지와 얼음으로 이루어져 있으며, 이 가운데 얼음의 80%는 H<sub>2</sub>O로 구성되었기 때문에 혜성이 태양으로부터 3-5AU에 이르면서부터 코마의 모습이 확인되기 시작하며, 코마의 절대밝기는 태양-혜성 간 거리, 그리고 혜성 핵에서 방출되는 기체의 양과 성분에 따라 결정된다.

혜성 궤도는 대부분 이심률이 큰 타원이기 때문에 일생의 거의 대부분을 태양에서 멀리 떨어진 온도가 절대 영도에 가까운 오르트 구름이나 카이퍼대(Kuiper belt)에서 얼음 덩어리의 단단한 고체 상태로 보내게 된다. 그러나 혜성이 태양에 접근함에 따라 가열되기 시작한다. 물이 수증기로 증발하면서 다시 그 속에 갇혀 있던 고체 입자들이 함께 방출된다. 혜성은 태양에 접근함에 따라 계속해서 에너지를 흡수한다. 흡수된 에너지의 대부분은 물질을 증발시키는데 이용되고 일부는 표면을 가열시키는데 이용된다. 일단 혜성이 태양계 안쪽으로 들어오게 되면 태양에 근접하여 다시 오르트 구름으로 돌아가게 되거나, 태양의 근일점을 통과하는 과정에 너무 근접하여 태양에 충돌해 버리거나 강한 중력에 의해 쪼개지는 경우도 있다. 주기혜성과 궤도 형태가 비슷하나 근일점이 2-3배 태양반경 이내에 있어 태양에 매우 가까이 근접하는 혜성을 sungrazing 혜성이라고 하며, Kreutz족이라고도 불리운다(Marsden 1967). 이 혜성들은 태양의 중력에 이끌려 태양과 충돌하거나 대부분은 태양 중력에 의해 부서진다. 이러한 sungrazing 혜성들의 궤도 특성들은 이미 잘 분류된 바 있다(이성은 외 2007).

한편 태양풍의 고전리된 중원소이온(O<sup>6+</sup>)은 혜성 표면의 중성입자와의 충돌에 의한 전하교환의 상호작용에 의해 혜성에서 X-선 및 자외선이 방출된다(Gombosi et al. 1983, Cravens 2000, 2002, Bhardwaj et al 2002). X-선의 복사량은 태양풍 고전리이온과 혜성 표면의 중성입자의 수밀도에 비례하기 때문에 혜성이 태양에 가까워질수록 증가하게 된다. sungrazing 혜성의 경우, 태양 근처에서 발생하는 X-선 복사량은 태양에서 방출되는 X-선 복사량과 견주어 보아, 태양 근처에서 혜성의 존재를 확인할 수 있을 것으로 예상된다.

이 논문에서는 연 X-선(soft X-ray)을 감지하는 태양 카메라로서의 기능 수행 및 활용을 시험하기 위해서 sungrazing 혜성의 관측을 통해서 혜성이 방출하는 X-선 복사량을 기존의 혜성연구에서 제시된 모델(Mendis & Flammer 1984, Cravens 1997)을 적용하여 혜성의 검출가능성을 알아보고자 한다.

## 2. 혜성의 X-선 방출

Cravens(1997)에 의하면 태양풍에 존재하는 이온들은 중성입자와 전하 교환을 할 수 있다. 예를

들면,  $O^{6+}$  이온은  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $O$ ,  $H$  등과 같은 혜성의 중성입자와 전하 교환을 통해서  $O^{5+}$  이온을 만들어낸다. 일부  $O^{5+}$  이온은 여기된 상태로 존재할 수 있어서 광자를 방출한다.



$O^{5+}$  이온은 다시 전하교환을 통해서 여기된  $O^{4+}$  이온을 바뀌면서 광자를 방출할 수 있다. 이와 같은 화학반응은 원자  $O$ 를 만들어낼 때까지 계속 진행된다. 이렇게 고전리된  $C$ ,  $N$ ,  $O$ ,  $Si$ ,  $Fe$ 와 같은 원소 이온들이 계단적인 전하교환 반응을 통해서 극자외선과 X-선을 방출할 수 있다.

Hyakutake 혜성의 X-선 광도를 구하기 위해 Cravens(1997)가 사용한 수학적 방법과 인수를 그대로 적용하면, 부피에너지 방출률(volume energy emission)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P(r) = n_n(r) n_{sw}(r) \langle g \rangle (r) \sum_s f_s \sum_q f_{sq} \sigma_{sq} \sum_j f_{sqj} \Delta E_{sqj} \quad (2)$$

$n_n$ ,  $n_{sw}$ ,  $\langle g \rangle$ 는 혜성 중성입자 수밀도, 태양풍 수밀도, 혜성 중성입자에 대한 태양풍 이온의 평균 속도이다.  $s$ 는 원소의 종류이며,  $q$ 는  $s$ 원소의 전하 상태,  $j$ 는 천이수를 의미한다. 태양풍 중원소  $s$ 의 방출 비율(fraction of solar wind ion species  $s$ )은  $f_s$ 로,  $f_{sq}$ 는 원소  $s$ 의 전하 상태  $q$ 에서 방출 비율을 나타낸다. 전하 상태  $q$ 에 대한 전하교환 단면적은  $\sigma_{sq}$ 로 표시되었고 원소  $s$ 의 전하 상태  $q$ 에서 천이 단계  $j$ 에 대한 방출 가능성은  $f_{sqj}$ 로 표기하고 이에 해당하는 천이 에너지는  $\Delta E_{sqj}$ 로 표시한다. 일반적으로 지구 근방에서 태양풍 수밀도는  $10\text{cm}^{-3}$  정도이고 태양으로부터 멀어질수록 태양의 거리( $d$  [AU])의 제곱에 반비례하게 된다( $n_{sw} = 10\text{cm}^{-3}d^{-2}$ ). 교란되지 않은 태양풍 이온 속도는 태양풍 평균속도와 같다고 할 수 있으므로  $\langle g \rangle = u_{sw} = 400\text{km/s}$  (Cravens 1997)의 값을 적용하였다. 혜성의 X-선 방출률을 근사시켜 계산하면  $\sigma_{sq} \approx \langle \sigma \rangle = 3 \times 10^{-15}\text{cm}^2$ ,  $\Delta E_{sqj} \approx \langle \Delta E \rangle \approx 200\text{eV}$ 의 값을 적용할 수 있다. 원소  $s$ 에 대한  $f_s$ 의 총합은  $\langle f_{s\text{tot}} \rangle \approx 10^{-3}$ , 극자외선이나 X-선을 방출하게 하는 전하교환 충돌 비율은 천이 단계  $j$ 에 대한  $f_{sqj}$ 의 총합은  $\langle f_{sqj} \rangle \approx 10^{-1}$ 을 사용하였다. 위의 가정을 그대로 적용하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 쓰여진다.

$$\begin{aligned} P(r) &\approx n_n n_{sw} u_{sw} \langle \sigma \rangle \langle f_{s\text{tot}} \rangle \langle f_{sqj} \rangle \langle \Delta E \rangle \\ &\cong 2.5 \times 10^{-9} n_n n_{sw} \quad (\text{eV cm}^{-3}\text{s}^{-1}) \end{aligned} \quad (3)$$

$n_n$ ,  $n_{sw}$ 은  $\text{cm}^{-3}$ 의 단위를 갖는다. 식 (3)으로부터 방출률은 중성입자 수밀도와 태양풍 수밀도에 비례한다는 것을 알 수 있다.

혜성의 총 X-선 광도는 식 (3)을 단위 부피에 대하여 적분하면 구할 수 있다. 이 때 X-선 영역에서 관측되는 코마 크기 범위를  $R \approx 10^4 - 10^5\text{km}$ 라 하고 태양풍 수밀도를 태양으로부터 거리( $d$ [AU]) 제곱에 반비례하는 거리 효과를 고려하여  $n_{sw} = 10\text{cm}^{-3}d^{-2}$ 로 적용하여 적분하면 식 (4)와 같다.

$$L \approx 4 \times 10^{-20} d^{-2} \int_{\text{comet}} n_n d^3x = 4 \times 10^{-20} \frac{\pi R}{2u_n \tau} Q \tau \quad (4)$$

한편, Mendis & Flammer(1984)의 모델에 의하면 중성입자 밀도는 식 (5)와 같다.

$$n_n = \frac{Q}{4\pi r^2 u_n} \quad (5)$$

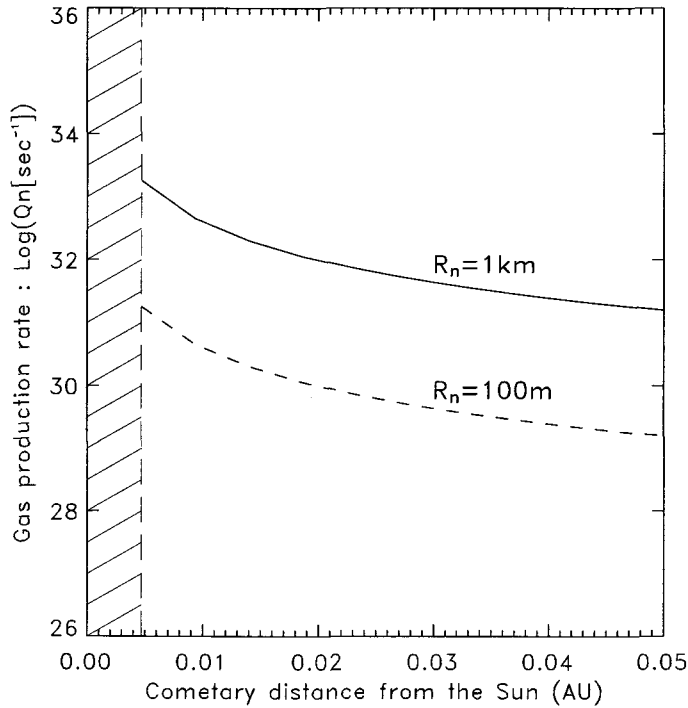


그림 1. 거리에 따른 혜성의 가스 생성률(Q).

여기에서  $Q$ 는 혜성의 총중성 가스 생성률을 나타내며  $u_n$ 은 중성입자의 방출속도 즉, 팽창속도(neutral expansion velocity)를 말하며 그 값은 약  $1\text{km/s}$ 이다(Cravens 1997). 식 (4)에서 에너지는 erg 단위로 변환되어야 하고 중성입자 밀도의 체적분은 beam의 부피에 대해서 이루어지고 총중성입자 밀도  $Q\tau$ 에 대한  $\frac{R}{u_n\tau}$ 의 비율로 근사될 수 있다.  $\tau$ 는 광이온화된 중성입자가 재결합을 통해 중성원자로 되돌아가는 중성원자의 광이온화에 대한 수명을 뜻하며, 약  $10^6\text{s}$ 에 해당한다(Cravens 1997).  $r$ 은 혜성중심으로부터의 거리로서 혜성의 복사 방출 한계를 의미하므로 무한히 큰 값으로 적용되는 것이 아니라 혜성 관측 크기와 같은 규모를 갖는다. 또 여기에서 가스 생성률  $Q$ 는 태양으로부터 거리에 따른 얼음의 승화율에 의해 결정(Crovisier & Encrenaz 2000)되므로 식 (6)과 같다.

$$Q = 4\pi R_n^2 Z \tag{6}$$

여기에서  $R_n$ 은 혜성 핵의 반지름이며,  $Z(\text{g s}^{-1}\text{cm}^{-2})$ 는 단위시간당 단위면적당 승화되는 혜성을 구성하는 얼음의 질량으로 승화율을 나타낸다. 여기서 얼음 표면의 상태변화에 대한 Clausius-Clapeyron 방정식(Bolton 1980)을 활용하여 혜성 표면에서 에너지 평형 방정식을 풀면 식 (7)과 같다.

$$\frac{J(1 - A_B)}{4d^2} = \epsilon_s \sigma T_s^4 + \frac{L_M}{N_A} Z \tag{7}$$

여기에서  $J$ 는 태양상수로 그 값은  $J = 1.35 \times 10^6 \text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 이다. 전파장에 대한 반사도는  $A_B = 0.225$ 로 정의되고, 적외선 복사율(emissivity)은  $\epsilon_s = 1 - A_B$ 로 정의된다.  $T_s$ 는 혜성 핵 표면의 온도

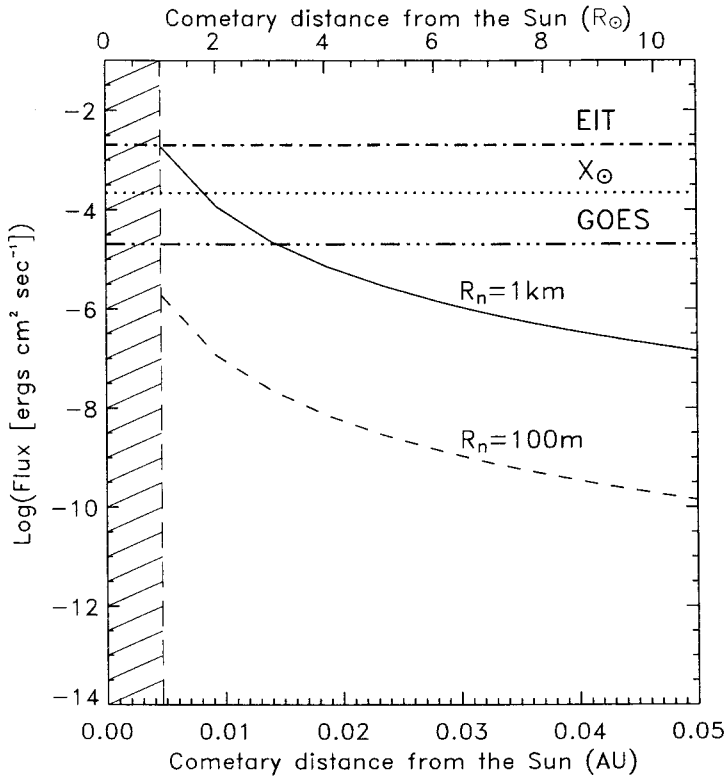


그림 2. 태양과 혜성의 거리에 따른 혜성의 X-선 플럭스.

로 373K가 적용되었다.  $L_M = 5.0 \times 10^{11} \text{erg/mole}$ 의 값은 혜성 얼음표면의 몰당 승화의 잠열을 나타낸다. 마지막으로  $N_A = 6.022 \times 10^{23} / \text{mole}$ 이며,  $N_A$ 는 아보가드로수를 뜻한다. 식 (7)을 통하여 가스 생성률을 태양으로부터 혜성의 거리  $d(\text{AU})$ 의 함수로 표현할 수 있다. 최종적으로 지구에서 관측한 혜성의 X-선 플럭스는 광도  $L$ 을 지구-혜성거리의 구표면적으로 나누어 계산하였다.

### 3. 연구결과

그림 1과 2는 이와 같은 계산 과정을 통해서 얻은 가스 생성률  $Q$ 와 혜성의 X-선 플럭스를 나타낸다. 그림 1과 2의 실선은  $R_n = 1\text{km}$ ,  $R = 10^5\text{km}$ 인 크기를 갖는 혜성의 경우이고, 파선은  $R_n = 100\text{m}$ ,  $R = 10^4\text{km}$ 의 크기를 갖는 혜성의 결과이다. 그림 1에서 계산된  $Q$ 값은 태양으로부터 거리 1AU, 팽창속도 1km/s일 때  $4.0 \times 10^{28} \text{s}^{-1}$ 로서 Huebner(1990)와 Cravens(1997, 2002)가 각각 제시한  $7.0 \times 10^{29} \text{s}^{-1}$ (태양으로부터 거리 0.9AU,  $R_n = 3.4\text{km}$ ),  $3.0 \times 10^{29} \text{s}^{-1}$ 과 비교해 볼 때 의미 있는 계산 결과로 볼 수 있다. 혜성의 X-선 방출을 나타낸 그림 2의 이점쇄선은 GOES 12의 연 X-선(280~540eV; 2.3~4.3nm) 영역에서 관측할 수 있는 임계값( $2.0 \times 10^{-5} \text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )을 나타내며, 일점쇄선은 SOHO 위성 EIT의 관측가능한 EUV의 임계값( $2.0 \times 10^{-3} \text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )을 나타낸다.

그리고, 점선은 2003년 6월 한 달간 관측된 GOES 12의 연 X-선 관측자료를 적용하여 구한 태양의 평균 X-선 플럭스 값( $2.18 \times 10^{-4} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )이다. 관측된 혜성의 X-선 방출 세기는 혜성 핵 반지름이 1km인 경우 태양에 근접했을 때 태양의 X-선 방출과 비기고, 태양으로부터 거리가 태양반경 3배 이내인 거리에서 GOES 위성의 X-선 망원경을 이용하여 검출 가능한 것으로 보인다. 따라서 우리는 X-선(또는 자외선) 카메라를 활용하여 태양반경 3배 미만 거리에 있는 직경 2km급 sungrazing 혜성을 발견할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

#### 4. 정 리

태양에 접근하여 충돌해 사라지는 sungrazing 혜성에서 발생하는 가스량 모델 Mendis & Flammer(1984)과 X-선 방출량 모델(Cravens 1997)을 적용하여 계산한 결과, 혜성핵의 반지름이 1km 정도인 경우 태양반경의 3배 이내인 거리에서 GOES 위성의 X-선 망원경으로 탐지가능한 것으로 보인다. 그리고, 이러한 관측의 성공 유무를 바탕으로 우리는 이 연구에서 이용한 혜성의 X-선 방출 모델(Cravens 1997)을 검증할 수 있을 것으로 예상한다. X-선 또는 자외선 태양 카메라를 활용하면 태양에 충돌하기 전 태양 근처에서의 sungrazing 혜성을 발견할 수 있을 것으로 기대된다.

**감사의 글:** 이 연구는 충남대학교 학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다. 오수연은 충남대 BK21 차세대 우주탐사 연구인력양성사업의 지원을 받았습니다.

#### 참고문헌

- 이성은, 이유, 김용하, Brandt, J. C. 2007, 한국우주과학회지, 24, 227
- Bhardwaj, A., Gladstone, G. R., Elsner, R. F., Waite, J. H., Jr., Grodent, D., Cravens, T. E., Howell, R. R., Metzger, A. E., Ostgaard, N., Maurellis, A. N., and 15 coauthors 2002, in Earth-like Planets and Moons, eds. B. Foing & B. Battrick (Noordwijk: ESA Publications), p.215
- Bolton, D. 1980, Monthly Weather Review, 108, 1046
- Cravens, T. E. 1997, Geophys. Res. Lett., 27, 105
- Cravens, T. E. 2000, Adv. Space Res., 26, 1443
- Cravens, T. E. 2002, Science, 296, 1042
- Crovisier, J. & Encrenaz, T. 2000, Comet Science: The Study of Remnants from the Birth of the Solar System (Cambridge: Cambridge University Press), pp.95-105
- Gombosi, T. I., Horanyi, M., Keckskemety, K., Cravens, T. E., & Nagy, A. F. 1983, ApJ, 268, 889
- Huebner, W. F. 1990, Physics and Chemistry of Comets (Berlin: Springer-Verlag), pp.13-44
- Marsden, B. G. 1967, AJ, 72, 1170
- Mendis, D. A. & Flammer, K. R. 1984, Earth, Moon, and Planets, 31, 301